



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 4 Nomor 6 Tahun 2024 Page 83-95

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

## Studi Optimalisasi Sudut Kemiringan dan Azimut Panel Surya Terhadap Output PLTS Menggunakan Perangkat Lunak PVSyst

Hutur Tuan Badogil<sup>1✉</sup>, Ahmad Dani<sup>2</sup>, Dino Erivianto<sup>3</sup>

Universitas Pembangunan Panca Budi

Email: [htuanbadogil@gmail.com](mailto:htuanbadogil@gmail.com)<sup>1✉</sup>

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan sudut kemiringan dan azimut pada panel surya untuk meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di Simpang Tanjung, Medan, Indonesia. Metode yang dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak simulasi PVSyst, pemodelan PLTS yang dilakukan dengan mempertimbangkan variasi sudut kemiringan dan azimut guna menentukan konfigurasi paling efisien untuk wilayah beriklim tropis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sudut kemiringan optimal adalah  $10^\circ$  dengan azimut  $-50^\circ$ , menghasilkan penerimaan energi maksimal sebesar  $1661 \text{ kWh/m}^2$  per tahun. Dengan konfigurasi ini, sistem panel surya mencapai total produksi energi sebesar  $1216 \text{ kWh}$  per tahun dan produksi spesifik sebesar  $1216 \text{ kWh/kWp/tahun}$ , yang menunjukkan performa yang signifikan. Tetapi masih terdapat kerugian produksi sebesar  $0,85 \text{ kWh/kWp/hari}$ , yang terutama disebabkan oleh shading dan suhu tinggi, sementara performance ratio (PR) tercatat sebesar  $0,732$ , yang menandakan bahwa  $73,2\%$  energi potensial berhasil dikonversi menjadi listrik. Meskipun ada kerugian akibat kondisi lingkungan dan karakteristik teknis, konfigurasi optimal ini tetap memberikan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan. Studi ini menghasilkan kontribusi untuk melakukan desain bagi optimalisasi PLTS pada berbagai kondisi geografis, khususnya di daerah tropis.

Kata Kunci: *Sudut Kemiringan, Azimut, PLTS, Efisiensi Energi, Panel Surya*

## Abstract

This research aims to optimize the tilt angle and azimuth on solar panels to improve the efficiency of solar power plants (PLTS) in Simpang Tanjung, Medan, Indonesia. The method is carried out by utilizing PVsyst simulation software, solar PV modeling is carried out by considering variations in tilt angles and azimuths to determine the most efficient configuration for tropical climates. The simulation results show that the optimal tilt angle is  $10^\circ$  with an azimuth of  $-50^\circ$ , resulting in a maximum energy reception of  $1661 \text{ kWh/m}^2$  per year. With this configuration, the solar panel system achieves a total energy production of 1216 kWh per year and a specific production of 1216 kWh/kWp/year, which shows significant performance. However, there was still a production loss of 0.85 kWh/kWp/day, which was mainly caused by shading and high temperatures, while the performance ratio (PR) was recorded at 0.732, indicating that 73.2% of potential energy was successfully converted into electricity. Despite the disadvantages due to environmental conditions and technical characteristics, this optimal configuration still provides an increase in overall system efficiency. This study results in a contribution to design for the optimization of solar power plants in various geographical conditions, especially in tropical areas.

Keywords: *Tilt Angle, Azimuth, Solar PV, Energy Efficiency, Solar Panels*

## PENDAHULUAN

Dalam menghadapi tantangan global terkait perubahan iklim dan kebutuhan energi yang terus meningkat, pemanfaatan energi terbarukan menjadi kunci untuk menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang paling berkembang adalah tenaga surya, yang memanfaatkan panel fotovoltaik (PV) untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) semakin banyak diterapkan di berbagai negara sebagai bagian dari strategi transisi energi global (Ayu et al., 2022; Dani & Erivianto, 2023). Efisiensi sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk radiasi matahari yang diterima, suhu lingkungan, serta pengaturan sudut kemiringan dan azimuth panel PV (Syahrir, 2024).

Pengaturan sudut kemiringan dan azimuth panel surya memegang peranan penting dalam memaksimalkan produksi energi dari sistem PV (L et al., 2014). Variasi sudut kemiringan dapat mempengaruhi jumlah radiasi yang diterima oleh modul PV secara signifikan (Zakri et al., 2018). Selain sudut kemiringan, sudut azimuth, yang merupakan arah horizontal di mana panel PV menghadap, juga berpengaruh pada kinerja sistem secara keseluruhan. Pengaturan sudut azimuth yang tepat dapat mengurangi penurunan kinerja akibat bayangan parsial atau shading (Oufettoul et al., 2023).

Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan untuk simulasi kinerja PLTS adalah PVSyst (Hermawan & Nurpulaela, 2024), yang memungkinkan pengguna untuk memodelkan dan menganalisis berbagai konfigurasi panel surya untuk menentukan pengaturan yang paling efisien (AMIN, 2024; Dani & Erivianto, 2024). Memanfaatkan PVSyst untuk meningkatkan efisiensi sistem PV off-grid pada skala rumah tangga dan menemukan bahwa simulasi yang dilakukan dapat memberikan panduan yang berguna dalam pengaturan parameter instalasi (Dani & Erivianto, 2022). Penelitian ini akan memanfaatkan PVSyst untuk mengeksplorasi konfigurasi sudut kemiringan dan azimuth yang optimal dalam konteks yang lebih luas.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh sudut kemiringan dan azimuth terhadap efisiensi sistem PLTS. Abidin, Mahyuddin, dan Zainuri (2023) meneliti sistem agrivoltaik dan menekankan pentingnya orientasi sudut kemiringan dalam meningkatkan produksi energi sambil mempertahankan pencahayaan yang memadai untuk tanaman (Abidin et al., 2023). Temuan ini menyoroti bagaimana pengaturan sudut yang tepat tidak hanya meningkatkan output energi tetapi juga mempertimbangkan aspek lingkungan lainnya.

Bhang et al. (2023) melakukan penelitian pada sistem fotovoltaik bifasial yang mengapung dan menemukan bahwa pengaturan sudut azimuth yang optimal dapat meningkatkan kinerja sistem dengan memanfaatkan refleksi sinar matahari dari permukaan air (Bhang et al., 2023). Penelitian oleh Bonthagorla dan Mikkili (2022) berfokus pada konfigurasi array panel PV untuk meminimalkan kehilangan daya akibat bayangan parsial, dan menunjukkan bahwa susunan yang optimal dapat mengurangi kerugian daya secara signifikan (Bonthagorla & Mikkili, 2022). Sementara itu, Oufettoul et al. (2023) menyoroti pentingnya variasi posisi modul PV dalam array dan pengaruhnya terhadap kinerja sistem di bawah kondisi shading, menekankan perlunya penyesuaian sudut kemiringan yang tepat (Oufettoul et al., 2023). Sumarno dan Kinasih (2024) melakukan studi pada optimasi sudut azimuth dan kemiringan panel surya di kafe kampus, menemukan bahwa sudut yang optimal sangat bergantung pada lokasi geografis dan waktu sepanjang tahun (Sumarno & Kinasih, 2024).

Meskipun banyak penelitian telah membahas pengaruh sudut kemiringan dan azimuth, masih ada kekurangan dalam aplikasi praktis yang mencakup berbagai kondisi geografis dan iklim. Penelitian sebelumnya seringkali terfokus pada situasi spesifik atau aplikasi tertentu, seperti sistem agrivoltaik atau fotovoltaik bifasial (Abidin et al., 2023; Bhang et al., 2023). Belum ada pendekatan menyeluruh yang mengeksplorasi bagaimana

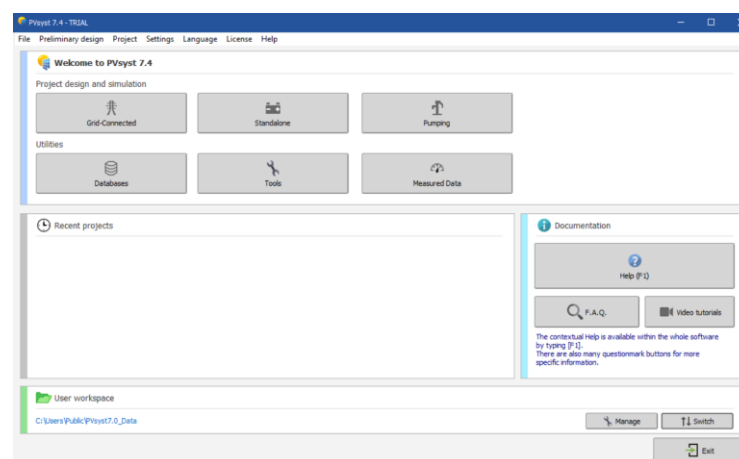
berbagai kondisi lingkungan dan geografis mempengaruhi optimasi sudut kemiringan dan azimut dalam sistem PLTS yang lebih umum. Selain itu, meskipun perangkat lunak PVSystem telah terbukti efektif dalam simulasi, aplikasi praktis dari hasil simulasi ini dalam konteks yang lebih luas masih perlu dieksplorasi lebih lanjut (Dani & Erivianto, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan yang ada dengan mengeksplorasi bagaimana pengaturan sudut kemiringan dan azimut dapat mempengaruhi output energi dari sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dalam berbagai kondisi geografis menggunakan simulasi PVSystem. Kemudian juga untuk mengidentifikasi sudut kemiringan dan azimut yang optimal guna meningkatkan output energi sistem fotovoltaik (PV) (Dani & Erivianto, 2022; Sumarno & Kinasih, 2024). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam desain dan optimasi sistem PLTS.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi untuk mengidentifikasi sudut kemiringan dan azimut optimal bagi panel surya (L et al., 2014; Syahrir, 2024). Pendekatan kuantitatif dipilih karena memungkinkan pengukuran yang objektif dan analisis statistik dari data yang diperoleh. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PVSystem, yang merupakan alat simulasi yang banyak digunakan dalam analisis kinerja sistem fotovoltaik (Dani & Erivianto, 2022; Hermawan & Nurpulaela, 2024).

PVSystem memungkinkan peneliti untuk melakukan pemodelan dari berbagai konfigurasi panel surya dan menganalisis output energi menggunakan data iklim yang spesifik. Dengan pendekatan ini, penelitian akan menghasilkan data yang akurat dan dapat diandalkan untuk menentukan pengaturan sudut yang optimal (Oufettoul et al., 2023).

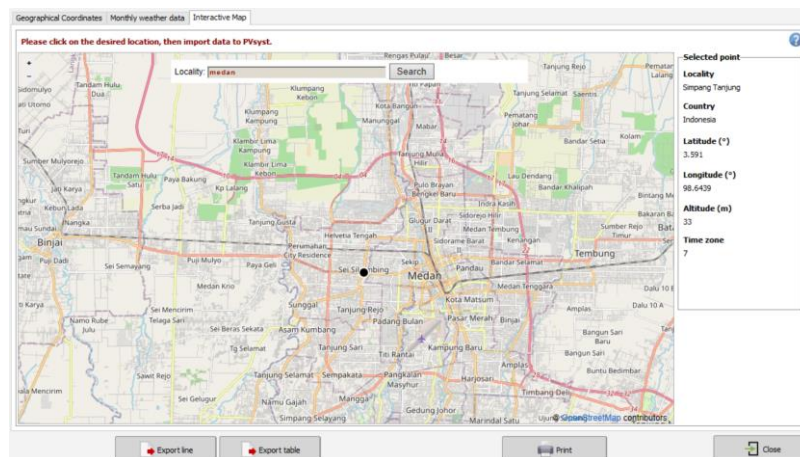


Gambar 1. Tampilan Aplikasi PVSyst 7.4

PVSyst adalah perangkat lunak yang digunakan untuk desain dan simulasi, dirancang untuk memudahkan pengembangan proyek. PVSyst memiliki database besar yang berisi data meteorologi dari berbagai lokasi di seluruh dunia. Selain itu, pengguna dapat menambahkan data yang diukur secara manual untuk lokasi yang tidak tercakup dalam perangkat lunak. Desain sistem Solar PV dapat bervariasi di setiap lokasi karena perbedaan jumlah radiasi matahari yang diterima di masing-masing tempat.

#### Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kota Medan, Sumatera Utara, Indonesia. Tepatnya titik lokasi yang di ambil untuk data radiasi adalah Simpang Tanjung (3.5911 LU, 98.6439 BT) terlihat pada gambar 1.



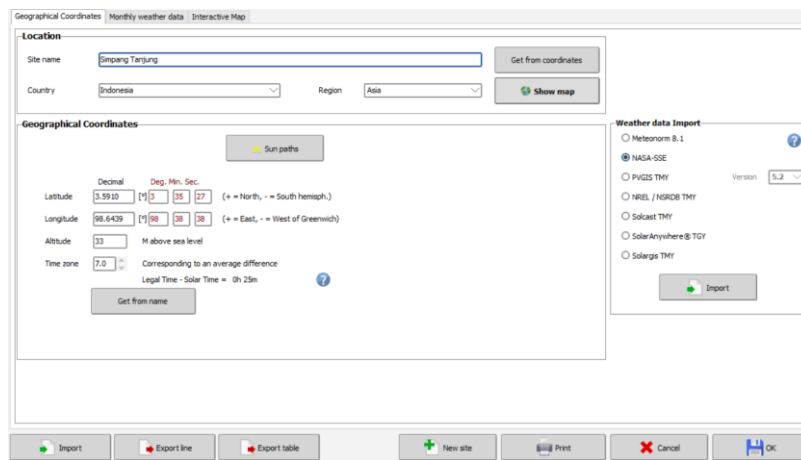
Gambar 2. Titik lokasi pengambilan data radiasi

Medan memiliki iklim tropis dengan suhu yang relatif konstan sepanjang tahun. Suhu rata-rata harian berkisar antara 24°C hingga 32°C, dengan variasi musiman yang minimal. Data iklim historis dari Mateo data Import NASA-SSE akan digunakan sebagai input dalam simulasi PVSyst. Penelitian ini akan menganalisis bagaimana variasi sudut kemiringan dan azimut mempengaruhi output energi tahunan di Medan.

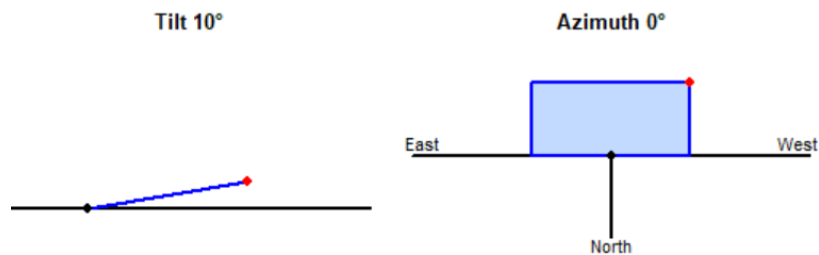
#### Pengumpulan Data

Data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini diimpor dari NASA-SSE (Surface Meteorology and Solar Energy). NASA-SSE menyediakan data satelit bulanan yang mencakup periode 1983-2005, dengan resolusi grid 1°x1° di seluruh dunia. Data ini mencakup berbagai parameter meteorologi dan energi surya yang diperlukan untuk analisis kinerja sistem fotovoltaik. Proses pengumpulan data dilakukan dengan mengakses

NASA-SSE melalui import data pada aplikasi PVsyst, memilih lokasi geografis penelitian, dan mengunduh data yang relevan. Tepatnya titik lokasi yang di ambil untuk data radiasi adalah Simpang Tanjung (3.5911 LU, 98.6439 BT)



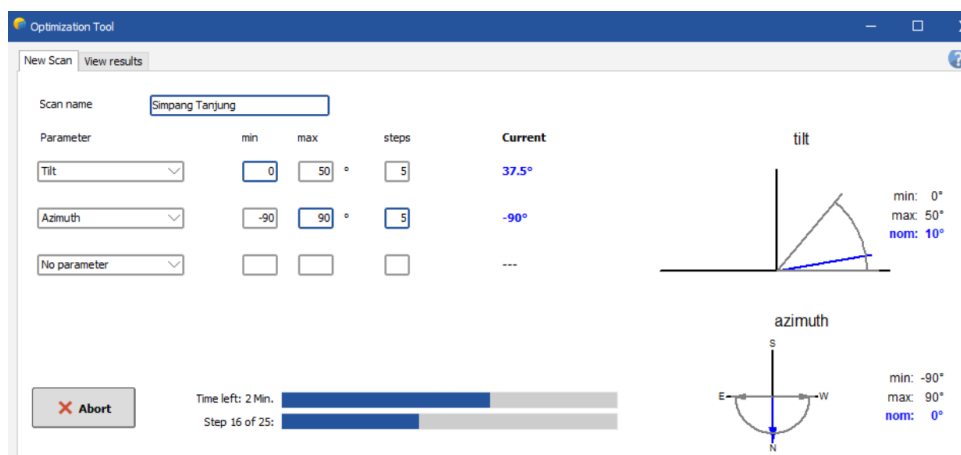
Gambar 3. Database NASA-SSE pada PVsyst



Gambar 4. Sudut kemiringan dan azimuth panel surya

### Optimalisasi Sudut Kemiringan dan Azimut

Sudut kemiringan adalah sudut di mana panel surya dipasang untuk menghadap matahari. Karena posisi matahari berubah setiap hari akibat rotasi bumi, sudut kemiringan panel harus disesuaikan. Biasanya, sudut kemiringan panel surya disesuaikan dengan garis lintang lokasi pemasangan. Sudut kemiringan optimal diperlukan untuk memaksimalkan jumlah energi matahari yang diterima oleh panel.



Gambar 5. Optimalisasi Sudut Kemiringan dan Azimut pada PVSyst

Sudut azimuth adalah sudut horizontal yang diukur dari arah utara sejati searah jarum jam hingga ke arah di mana panel surya atau objek lainnya menghadap. Dalam konteks panel surya, sudut azimuth menentukan orientasi horizontal panel terhadap matahari. Penyesuaian sudut azimuth yang tepat sangat penting untuk memastikan panel surya menerima radiasi matahari maksimal sepanjang hari. Dengan menggunakan PVSyst didapat sudut kemiringan yang optimal sesuai dengan garis lintang dan sudut Azimuth untuk menentukan arah matahari diambil menghadap arah selatan, seperti yang di perlihatkan pada gambar di bawah ini. Berbagai sudut kemiringan dan sudut azimuth akan diambil untuk melihat sudut yang menghasilkan output paling optimal dari PLTS.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian mengenai pengaruh arah pengaturan azimuth dan kemiringan panel surya, untuk data radiasi pada gambar 6. *Global Horizontal Irradiation* (GHI). Data yang digunakan untuk melihat potensi dari nilai Global Horizontal Irradiation (GHI), yaitu jumlah radiasi matahari yang mengenai permukaan horizontal di bumi. Nilai GHI penting karena berkaitan dengan jumlah radiasi yang diterima panel surya dan dikonversi menjadi energi listrik. Di lokasi penelitian di Simpang Tanjung, Medan, Indonesia, data menunjukkan rata-rata produksi listrik harian dalam bentuk kWh/m<sup>2</sup>/hari. Rata-rata GHI di Simpang Tanjung, Medan adalah 4,49 kWh/m<sup>2</sup>/hari, dengan nilai Diffuse Horizontal Irradiation (DHI) sebesar 2,03 kWh/m<sup>2</sup>/hari, dan nilai rata-rata GHI tahunan sebesar 4,55 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Adapun karakteristik dari sistem PV yang digunakan terlihat pada gambar 7 PV Array Characteristics.

	<b>Global horizontal irradiation</b> kWh/m <sup>2</sup> /day	<b>Horizontal diffuse irradiation</b> kWh/m <sup>2</sup> /day	<b>Temperature</b> °C	<b>Wind Velocity</b> m/s	<b>Linke turbidity</b> [-]	<b>Relative humidity</b> %
January	4.49	2.03	24.5	0.00	0.000	0.0
February	4.99	2.15	24.7	0.00	0.000	0.0
March	5.02	2.29	25.0	0.00	0.000	0.0
April	4.87	2.26	25.4	0.00	0.000	0.0
May	4.77	2.12	25.7	0.00	0.000	0.0
June	4.71	2.02	25.8	0.00	0.000	0.0
July	4.56	2.07	25.5	0.00	0.000	0.0
August	4.52	2.20	25.7	0.00	0.000	0.0
September	4.27	2.30	25.2	0.00	0.000	0.0
October	4.28	2.21	25.1	0.00	0.000	0.0
November	4.08	2.07	24.8	0.00	0.000	0.0
December	4.13	1.99	24.5	0.00	0.000	0.0
<b>Year</b>	<b>4.55</b>	<b>2.14</b>	<b>25.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.000</b>	<b>0.0</b>

Global horizontal irradiation year-to-year variability 5.6%

Gambar 6. *Global Horizontal Irradiation (GHI) Simpang Tanjung*

Dalam pengujian untuk menentukan titik optimalisasi sudut kemiringan dan arah pengaturan azimuth, digunakan beberapa parameter yang dirincikan dalam Tabel 1. Penentuan sudut kemiringan (tilt) dan arah pengaturan azimuth ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi panel surya dalam menangkap radiasi matahari.

PV Array Characteristics			
<b>PV module</b>		<b>Battery</b>	
Manufacturer	Trina Solar	Manufacturer	Generic
Model	TSM-310PD14	Model	Open 12V / 100 Ah
(Original PVsyst database)		Technology	Lead-acid, vented, plates
Unit Nom. Power	250 Wp	Nb. of units	4 in series
Number of PV modules	4 units	Discharging min. SOC	20.0 %
Nominal (STC)	1000 Wp	Stored energy	3.8 kWh
Modules	2 string x 2 ln series	<b>Battery Pack Characteristics</b>	
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Voltage	48 V
Pmpp	898 Wp	Nominal Capacity	100 Ah (C10)
U mpp	53 V	Temperature	Fixed 20 °C
I mpp	17 A	<b>Battery Management control</b>	
<b>Controller</b>		Threshold commands as	SOC calculation
Universal controller		Charging	SOC = 0.92 / 0.75
Technology	MPPT converter	approx.	54.6 / 49.5 V
Temp coeff.	-5.0 mV/°C/Elem.	Discharging	SOC = 0.20 / 0.45
<b>Converter</b>		approx.	46.4 / 48.3 V
Maxi and EURO efficiencies	97.0 / 95.0 %		
<b>Total PV power</b>			
Nominal (STC)	1.00 kWp		
Total	4 modules		
Module area	6.6 m <sup>2</sup>		
Cell area	5.8 m <sup>2</sup>		

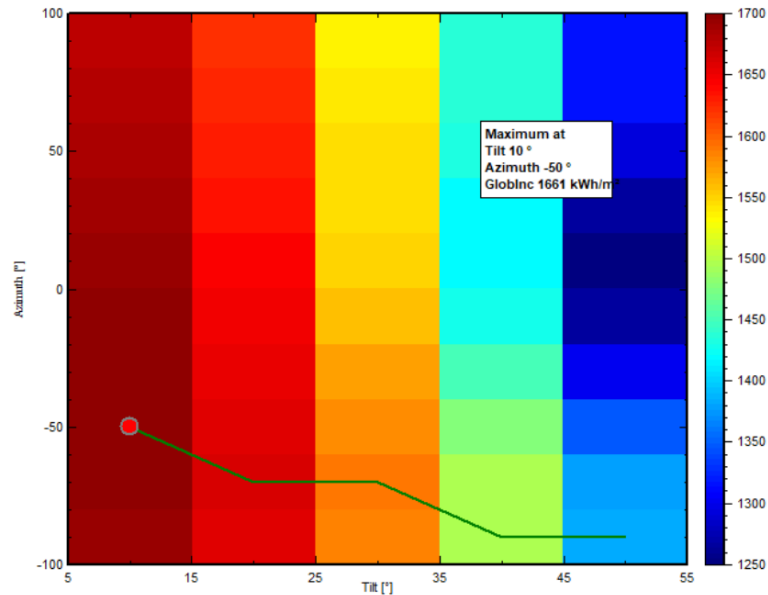
Gambar 7. PV Array Characteristics

Tabel 1 menyajikan parameter input untuk optimalisasi sudut kemiringan dan arah pengaturan azimuth sebagai berikut :

Tabel 1. Parameter input optimalisasi sudut kemiringan dan arah pengaturan azimuth

Parameter	Min	Max	Unit	Step
Tilt	10 <sup>0</sup>	50 <sup>0</sup>	[deg]	5
Azimut	-90 <sup>0</sup>	90 <sup>0</sup>	[deg]	10

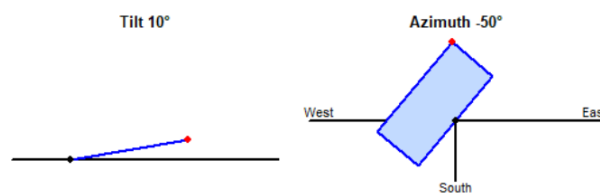
Pada tabel 1 tersebut, sudut kemiringan (tilt) memiliki rentang antara 10° hingga 50°, dengan pengujian dilakukan dalam 5 tahap. Kemudian arah pengaturan azimuth bervariasi dari -90° hingga 90°, dengan pengujian dalam 10 langkah. Dengan total 50 langkah variasi pengujian, variasi sudut kemiringan dan azimuth diharapkan dapat mengidentifikasi kombinasi yang paling optimal untuk memaksimalkan penyerapan energi matahari oleh panel surya. Hasil optimalisasi menunjukkan bahwa sudut kemiringan yang paling efisien adalah 10°, dan arah azimuth yang optimal adalah -50° terlihat pada gambar 7. Besar nilai radisai matahari dengan hasil optimalisasi sebesar 1661 kWh/m<sup>2</sup>.



Gambar 8. Hasil Optimalisasi Sudut Kemiringan dan Azimut

Pada sumbu horizontal, terlihat variasi sudut kemiringan dari  $5^\circ$  hingga  $55^\circ$ , sementara sumbu vertikal menunjukkan orientasi azimut dari  $-100^\circ$  hingga  $100^\circ$ . Warna latar belakang berfungsi sebagai indikator intensitas energi yang diterima, dengan gradasi dari merah tua hingga biru. Semakin merah warna, semakin tinggi intensitas energi yang diterima panel surya.

Titik optimal ditandai dengan lingkaran merah pada gambar, yang menunjukkan bahwa sudut kemiringan  $10^\circ$  dan azimut  $-50^\circ$  adalah konfigurasi terbaik untuk lokasi ini. Pada titik ini, panel surya mampu mencapai penerimaan energi maksimum sebesar  $1661 \text{ kWh/m}^2$ .



Gambar 9. Sudut kemiringan (tilt) dan azimut yang optimal

Pada gambar 8. terlihat representasi visual dari sudut kemiringan (tilt) dan azimut yang telah ditentukan optimal. Pada bagian kiri, ilustrasi menunjukkan sudut kemiringan optimal sebesar  $10^\circ$ . Panel surya ditampilkan dengan miring sedikit dari garis horizontal, menandakan penyesuaian yang diperlukan untuk memaksimalkan penyerapan sinar matahari. Kemudian bagian kanan gambar menunjukkan orientasi azimut optimal sebesar  $-50^\circ$ . Gambar ini menunjukkan posisi panel surya yang miring ke arah tenggara,

menciptakan sudut yang optimal terhadap posisi matahari. Pada gambar 8. terlihat jelas tentang bagaimana panel surya harus diposisikan untuk mencapai penerimaan energi maksimum, yaitu 1661 kWh/m<sup>2</sup>. Dengan konfigurasi ini, efisiensi energi dapat ditingkatkan secara optimal, memanfaatkan sinar matahari secara efektif sepanjang tahun.

Tabel 2. *Main Result* Simulasi PLTS

<i>Main Result</i>			
<i>System Production</i>	1216 kWh/yr	<i>Normalized production</i>	3.33 kWh/kWp/day
<i>Specific production</i>	1216 kWh/kWp/yr	<i>Array losses</i>	0.85 kWh/kWp/day
<i>Performance Ratio</i>	0.732	<i>System losses</i>	0.37 kWh/kWp/day

Dalam analisis kinerja sistem panel surya, data yang diperoleh menunjukkan hasil yang signifikan mengenai produksi energi dan efisiensi. Sistem panel surya ini memproduksi 1216 kWh/tahun, mencerminkan potensi energi yang dapat dihasilkan selama satu tahun. Dengan nilai 3.33 kWh/kWp/hari, produksi normalisasi menunjukkan rata-rata energi yang dihasilkan per kilowatt peak (kWp) dari kapasitas sistem per hari, yang menandakan bahwa sistem beroperasi dengan baik dalam memanfaatkan sinar matahari yang tersedia.

Tabel 3. Hasil Output Daya Panel Surya Setiap Bulan Selama Satu Tahun

P	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
r January	139.2	141.5	118.5	8.098	95.3	105.9	201.3	0.526
O February	139.7	139.9	117.0	6.745	78.8	102.9	181.8	0.566
d March	155.6	152.3	126.3	8.562	90.3	111.0	201.3	0.552
u April	146.1	139.5	116.5	4.156	88.7	106.0	194.8	0.545
k May	147.9	138.7	116.0	2.628	94.5	106.8	201.3	0.531
s June	141.3	130.1	109.0	1.773	93.2	101.6	194.8	0.522
i July	141.4	132.1	110.8	2.601	100.5	100.8	201.3	0.501
August	140.1	133.4	111.9	2.424	97.9	103.3	201.3	0.513
S September	128.1	123.4	102.3	4.209	103.0	91.7	194.8	0.471
P October	132.7	129.8	108.0	5.192	104.9	96.3	201.3	0.479
e November	122.4	122.8	102.7	2.911	100.9	93.9	194.8	0.482
s December	128.0	130.2	108.5	6.691	105.6	95.6	201.3	0.475
i Year	1662.5	1613.8	1347.5	55.990	1153.7	1215.9	2369.6	0.513

fik tercatat sebesar 1216 kWh/kWp/tahun, menjadi indikator penting untuk menilai performa sistem secara keseluruhan. Namun, kerugian dari array panel surya mencapai 0.85 kWh/kWp/hari, menunjukkan adanya faktor-faktor yang mengurangi produksi energi optimal, seperti shading atau suhu tinggi. Performance ratio (PR) sebesar 0.732 menunjukkan efisiensi operasional sistem, di mana sekitar 73.2% dari energi yang dapat dihasilkan secara teoritis berhasil diproduksi, yang merupakan angka baik dalam industri. Selain itu, kerugian sistem tercatat sebesar 0.37 kWh/kWp/hari, mencerminkan kerugian akibat resistansi kawat, inverter, dan faktor lainnya yang mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem panel surya beroperasi dengan efisien, meskipun terdapat beberapa kerugian yang harus diperhatikan untuk meningkatkan performa di masa depan. Upaya untuk meminimalkan array losses dan system losses dapat membantu dalam meningkatkan performance ratio dan total produksi energi.

Dari hasil optimalisasi sudut kemiringan dan azimuth dari panel surya, didapat hasil output daya panel surya setiap bulan selama satu tahun yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2 di atas. Dengan Iradiasi Horizon Global dalam satu tahun sebesar 1662.5 kWh/m<sup>2</sup>. Iradiasi efektif Global tahunan adalah 1613.8 kWh/m<sup>2</sup>. Energi listrik yang dihasilkan oleh Panel Surya adalah 1347.5 kWh. Besar energi listrik yang diberikan kepada pengguna adalah 1215.9 kWh. Sedangkan energi yang dibutuhkan beban listrik selama setahun adalah 2369.6 kWh.

## SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan di Simpang Tanjung, Medan, Indonesia, kesimpulan utama yang diperoleh terkait optimalisasi sudut kemiringan (tilt) dan arah azimuth panel surya dalam meningkatkan efisiensi energi adalah sebagai berikut:

1. Nilai GHI dan Potensi Energi Matahari : Rata-rata nilai Global Horizontal Irradiation (GHI) tahunan mencapai 4,55 kWh/m<sup>2</sup>/hari, menunjukkan potensi yang baik untuk konversi energi matahari menjadi listrik melalui panel surya di wilayah tersebut.
2. Optimalisasi Sudut Kemiringan dan Azimut : Pengujian menunjukkan bahwa sudut kemiringan 10° dan azimuth -50° adalah kombinasi yang paling efisien untuk menangkap radiasi matahari. Konfigurasi ini menghasilkan penerimaan energi maksimum sebesar 1661 kWh/m<sup>2</sup>.
3. Produksi dan Efisiensi Energi : Sistem panel surya menghasilkan energi tahunan sebesar 1216 kWh dengan produksi spesifik sebesar 1216 kWh/kWp/tahun.

Performance ratio (PR) sistem mencapai 0.732, mengindikasikan bahwa 73,2% energi potensial berhasil dikonversi menjadi listrik.

4. Kerugian Sistem : Terdapat kerugian array sebesar 0.85 kWh/kWp/hari dan kerugian sistem sebesar 0.37 kWh/kWp/hari yang dipengaruhi oleh faktor shading, suhu, dan resistansi, yang secara keseluruhan masih dalam batas yang wajar tetapi memerlukan perbaikan untuk meningkatkan efisiensi.
5. Konsumsi dan Pasokan Energi : Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya mencapai 1347.5 kWh, dengan energi yang disalurkan ke pengguna sebesar 1215.9 kWh, namun kebutuhan energi tahunan sebesar 2369.6 kWh belum sepenuhnya terpenuhi oleh sistem.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sudut kemiringan dan azimuth yang optimal dapat meningkatkan efisiensi energi dari sistem panel surya, meskipun terdapat beberapa aspek kerugian yang masih perlu dikurangi untuk mencapai performa yang lebih tinggi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, M. A. Z., Mahyuddin, M. N., & Zainuri, M. A. A. M. (2023). Optimal Efficient Energy Production by PV Module Tilt-Orientation Prediction Without Compromising Crop-Light Demands in Agrivoltaic Systems. *IEEE Access*, *11*, 71557–71572. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3293850>
- AMIN, M. T. (2024). A Comparative Analysis of Various Simulation Software for grid-connected Residential Building: A Case Study at Jeddah, Saudi Arabia. *Yanbu Journal of Engineering and Science*, *21*(1). <https://doi.org/10.53370/001C.94809>
- Ayu, F., Sugiono, F., Diah Larasati, P., Eriko, D., & Karuniawan, A. (2022). PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN PANEL SURYA TERHADAP POTENSI PEMANFAATAN PLTS ROOFTOP DI BENGKEL TEKNIK MESIN, POLITEKNIK NEGERI SEMARANG. *JURNAL REKAYASA ENERGI*, *1*(1), 1–8. <https://doi.org/10.31884/JRE.V1I1.5>
- Bhang, B. G., Hyun, J. H., Ahn, S. H., Choi, J. H., Kim, G. G., & Ahn, H. K. (2023). Optimal Design of Bifacial Floating Photovoltaic System With Different Installation Azimuths. *IEEE Access*, *11*, 1456–1466. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233100>
- Bonthagorla, P. K., & Mikkili, S. (2022). Optimal PV Array Configuration for Extracting Maximum Power under Partial Shading Conditions by Mitigating Mismatching Power Losses. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, *8*(2), 499–510. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.02730>

- Dani, A., & Erivianto, D. (2022). Studi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid Skala Rumah Tangga pada Daerah Bagan Deli Menggunakan Pvsyst. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 3(09), 961–972. <https://doi.org/10.59141/JIST.V3I09.496>
- Dani, A., & Erivianto, D. (2023). *Study on the Effect of Solar Radiation Changes on Solar Panels Using Matlab/Simulink*. 13, 103–110.
- Dani, A., & Erivianto, D. (2024). Potential of rooftop solar electric energy on campus buildings high school of technology Sinar Husni using helioscope software. *Jurnal Info Sains: Informatika Dan Sains*, 14(01), 219–231. <https://ejournal.seaninstitute.or.id/index.php/InfoSains/article/view/3839>
- Hermawan, S., & Nurpulaela, L. (2024). Penilaian Produktivitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terhadap Variabilitas Cuaca: Simulasi PVsyst. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 10(1), 61–74. <https://doi.org/10.35308/JMKN.V10I1.9232>
- L, P. D., Hermawan, H., & Karnoto, K. (2014). ANALISIS PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN PANEL SURYA TERHADAP RADIASI MATAHARI YANG DITERIMA OLEH PANEL SURYA TIPE LARIK TETAP. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 2(4), 930–937. <https://doi.org/10.14710/TRANSIENT.V2I4.930-937>
- Oufettoul, H., Lamdihine, N., Motahhir, S., Lamrini, N., Abdelmoula, I. A., & Aniba, G. (2023). Comparative Performance Analysis of PV Module Positions in a Solar PV Array Under Partial Shading Conditions. *IEEE Access*, 11, 12176–12194. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237250>
- Sumarno, R. N., & Kinasih, K. (2024). *Optimization of The Azimuth Direction and Tilt of The Campus Cafe Rooftop Solar Panels*. 97–107. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-480-8\\_8](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-480-8_8)
- Syahrir, W. (2024). Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan Sistem On Grid di Gedung Kantor Pelabuhan PT. Pupuk Kalimantan Timur. *Syntax Idea*, 6(1), 470–487. <https://doi.org/10.46799/SYNTAX-IDEA.V6I1.2931>
- Zakri, A. A., Rosma, I. H., & Simanullang, D. P. H. (2018). Effect of solar radiation on module photovoltaics 100 Wp with variation of module slope angle. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 6(1), 45–52. <https://doi.org/10.11591/IJEEI.V6I1.351>